УДК 532.517.4:532.695

# ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ РАЗБАВЛЕННЫХ ЭМУЛЬСИЙ

*В. Ф. Медведев, Л. П. Медведева*

(*Грозный*)

Получено уравнение для определения коэффициента гидравлического сопротивления разбавленных эмульсий с использованием концепции турбулентной вязкости и явления гашения турбулентных пульсаций. Результаты теории сравниваются с экспериментом.

Если некоторая масса жидкости попадает в турбулентный поток не смешивающейся с ней жидкости, обладающий достаточно высокой степенью турбулентности, то возникает дробление этой жидкости под воздействием турбулентных пульсаций [1—3]. В этом случае при малом содержании диспергируемой жидкости образуется разбавленная эмульсия. Наименьший диаметр капелек такой эмульсии будет превышать внутренний масштаб турбулентных пульсаций и может быть определен в зависимости от межфазного натяжения $\sigma$, плотности дисперсионной среды $\rho_1$, внутреннего диаметра трубы $D$ и средней скорости течения $w$ по формуле А. Н. Колмогорова [2,3]

$$d = 2\sqrt{2}\left(\frac{\sigma}{k\rho_1}\right)^{3/5}\frac{D^{2/5}}{w^{6/5}}, \tag{1}$$

где $k \approx 0{,}5$ — коэффициент сопротивления при обтекании капли.

Для описания турбулентного течения разбавленных эмульсий используется концепция вязкости, развитая в полуэмпирической теории турбулентности М. Д. Миллионщикова [4—6], при этом учитывается влияние диспергированной жидкости на коэффициенты динамической $\mu_э$ и турбулентной $\mu_{тэ}$ вязкости эмульсии.

Разбавленные эмульсии ведут себя подобно простым жидкостям и подчиняются законам Ньютона и Пуазейля. Уравнение движения разбавленных эмульсий в трубе запишем в виде

$$(\mu_э + \mu_{тэ})\frac{du}{dy} = \tau, \tag{2}$$

где $u$ и $\tau$ — скорость и касательное напряжение на расстоянии $y$ от стенки трубы. Касательное напряжение в данном сечении в предположении осевой симметрии связано с касательным напряжением на стенке $\tau_\omega$ соотношением

$$\tau = \tau_\omega(1 - y_0),$$

где $y_0$ — безразмерное расстояние от стенки, определяемое отношением $y$ к радиусу трубы $r$, т. е. $y_0 = y/r$.

Влияние глобул диспергированной жидкости на коэффициент динамической вязкости разбавленной эмульсии проявляется в том, что динамическая вязкость эмульсии $\mu_э$ возрастает с ростом содержания дисперсной фазы $\beta$, превышая вязкость дисперсионной среды $\mu_1$. Бринкман [7] для случая, когда капли движутся независимо одна от другой, получил

$$\mu_э = \mu_1(1 - \beta)^{-2{,}5}. \tag{3}$$

Для разбавленных эмульсий формула (3) дает хорошее согласование с опытными данными и может быть использована в уравнении движения (2).

Для течения эмульсий в трубе масштабом для пульсационных скоростей в области развитой турбулентности является динамическая скорость, соответствующая касательному напряжению на данном радиусе [4—6]:

$$v_{*y\text{э}}=v_{*\text{э}}\sqrt{1-y_0}, \tag{4}$$

где $v_{*\text{э}}=\sqrt{\tau_\omega/\rho_\text{э}}$ — динамическая скорость. При этом плотность эмульсии $\rho_\text{э}$ определяется аддитивно $\rho_\text{э}=\rho_1(1-\beta)+\rho_2\beta$, где $\rho_2$ — плотность дисперсной фазы.

Уравнение (2) может быть представлено в виде

$$(\nu_\text{э}+\nu_{\text{тэ}})\frac{du}{dy}=v_{*\text{э}}^2(1-y_0)=v_{*y\text{э}}^2, \tag{5}$$

где $\nu_\text{э}$ —коэффициент кинематической вязкости эмульсии ($\nu_\text{э}=\mu_\text{э}/\rho_\text{э}$); $\nu_{\text{тэ}}$ — турбулентная кинематическая вязкость ($\nu_{\text{тэ}}=\mu_{\text{тэ}}\,\rho_\text{э}$).

Определим турбулентную кинематическую вязкость как произведение динамической скорости $v_{*y\text{э}}$ на данном радиусе и пути смешения $l_\text{э}$

$$\nu_{\text{тэ}}=v_{*y\text{э}}l_\text{э}. \tag{6}$$

Тогда уравнение (5) с учетом (4), (6) примет вид

$$\left(\nu_\text{э}+v_{*\text{э}}l_\text{э}\sqrt{1-y_0}\right)\frac{du}{dy}=v_{*\text{э}}^2(1-y_0).$$

Из этого уравнения видно, что при достаточно больших значениях числа Рейнольдса, когда вязкостью можно пренебречь, логарифмическому профилю соответствует изменение $l_\text{э}$ по радиусу в соответствии с формулой

$$l_\text{э}=a_\text{э}(y-\delta_\Lambda)\sqrt{1-y_0},$$

где $a_\text{э}$ — безразмерный коэффициент, $\delta_\Lambda$ — толщина ламинарного подслоя. Для однофазных жидкостей значение безразмерного коэффициента и толщины ламинарного подслоя определены в [4—6] на основании обработки экпериментальных данных: $a=0$ для ламинарного течения и $a=0{,}39$ для развитого турбулентного течения и $\delta=v_*\delta_\Lambda/\nu=7{,}8$.

Влияние глобул диспергированной жидкости на турбулентную кинематическую вязкость проявляется в уменьшении длины пути смешения по сравнению с турбулентным течением однофазной жидкости.

Поскольку пленка поверхностно-активных веществ, адсорбируемых на поверхности раздела жидкостей, препятствует проникновению пульсационных движений внутрь глобул, то уменьшение длины пути смешения при турбулентном течении эмульсии определяется прежде всего уменьшением объема, в котором происходит диссипация турбулентной энергии (из общего объема ядра турбулентного потока необходимо исключить объем, занимаемый глобулами дисперсной фазы), т. е. в безразмерный коэффициент длины пути смешения следует ввести множитель $(1-\beta)$. Кроме того, поскольку размер капелек рассматриваемой эмульсии превышает внутренний масштаб турбулентности дисперсионной среды $\lambda_0$, происходит некоторое гашение турбулентных пульсаций на поверхности этих капелек. Если считать, что полное гашение турбулентных пульсаций в дисперсионной среде имеет место в эмульсии с плотной упаковкой глобул такого диаметра $d_\text{п}$, что просвет между ними не превышает $\lambda_0$, то эффективность гашения турбулентных пульсаций на поверхности глобул разбавленной эмульсии может быть учтена множителем $(1 - S/S_п)$ к безразмерному коэффициенту длины пути смешения, где $S/S_п$ — отношение межфазных поверхностей разбавленной и наиболее плотной эмульсий. Таким образом,

$$a_э = 0{,}39(1 - \beta)(1 - S/S_п).$$

Объемная доля дисперсной фазы при теснейшем расположении глобул в плотной эмульсии $\beta_п = 0{,}741$ [8].

Поэтому

$$\frac{S}{S_п} = \frac{\beta}{0{,}741}\frac{d_п}{d}. \tag{7}$$

Рассматривая модель теснейшего расположения глобул, из геометрических представлений найдем, что наибольший размер просвета между глобулами составляет $h = 0{,}365 d_п$. Внутренний масштаб турбулентности дисперсионной среды $\lambda_0$ определим из условия, что число Рейнольдса для движения масштаба $\lambda_0$ равно единице [3]:

$$\lambda_0 = \frac{D}{\mathrm{Re}_1^{3/4}} = \left(\frac{D^{1/3}\mu_1}{w\rho_1}\right)^{3/4}.$$

Приравнивая $h$ и $\lambda_0$, найдем, что

$$d_п = 2{,}74\left(\frac{D^{1/3}\mu_1}{w\rho_1}\right)^{3/4}. \tag{8}$$

Подставляя в (7) выражения (1), (8), получаем

$$S/S_п = 0{,}863\beta M^{0,15},$$

где $M = \dfrac{\mu_1^5 w^3}{D\rho_1\sigma^4}$ — безразмерный параметр.

В результате для безразмерного коэффициента длины пути смешения окончательно имеем

$$a_э = 0{,}39(1 - \beta)(1 - 0{,}863\beta M^{0,15}). \tag{9}$$

Толщину ламинарного подслоя, очевидно, можно считать аналогично однофазной жидкости: $\delta = v_{*э}\delta_\Lambda/\nu_э = 7{,}8$.

Таким образом, уравнение движения разбавленной эмульсии в трубе принимает вид

$$[b_э + a_э(y_0 - \delta_0)(1 - y_0)]\frac{du/v_{*э}}{dy_0} = 1 - y_0,$$

где $b_э = \nu_э / r v_{*э}$, $\delta_0 = \delta_\Lambda / r$,

$a_э = 0$ при $y_0 < \delta_0$;

$a_э = 0{,}39(1 - \beta)(1 - 0{,}863\beta M^{0,15})$ при $y_0 \geqslant \delta_0$.

Интегрируя это уравнение с учетом плавного смыкания с ламинарным подслоем, имеем

$$\frac{u}{v_{*э}} = \frac{1}{b_э}\left(y_0 - \frac{y_0^2}{2}\right) \quad \text{при } y_0 < \delta_0, \tag{10}$$

$$\frac{u}{v_{*э}} = \frac{1}{2a_э}\left\{\ln\left[1 + \frac{a_э}{b_э}(y_0 - \delta_0)(1 - y_0)\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{1-\delta_0}{\sqrt{\Delta}} \ln \frac{\{\sqrt{\Delta} + [2y_0 - (1+\delta_0)]\}\,[\sqrt{\Delta} - (\delta_0 - 1)]}{\{\sqrt{\Delta} - [2y_0 - (1+\delta_0)]\}\,[\sqrt{\Delta} + (\delta_0 - 1)]}\right\} + \delta\left(1 - \frac{\delta_0}{2}\right)$$

при $y_0 \geqslant \delta_0$, где $\sqrt{\Delta} = \sqrt{4\frac{b_э}{a_э} + (1 - \delta_0)^2}$.

Формулы (10) дают распределение скорости во всем диапазоне изменения $y_0$ от 0 до 1. Причем на оси трубы, т. е. при $y_0 = 1$, удовлетворяется условие $du/dy = 0$.

Коэффициент сопротивления при течении эмульсии в трубах определяется формулой

$$\lambda_э = 2\frac{D}{L}\frac{\Delta p}{\rho_э w^2} = 8\left(\frac{v_{*э}}{w}\right)^2,$$

где $\Delta p$ — перепад давления на длине $L$.

Среднее значение скорости определяется интегралом

$$w = 2\int_0^1 (1 - y_0)\, u\, dy_0.$$

При этом интегрирование разбивается на два участка: от 0 до $\delta_0$, где $a_э = 0$, и от $\delta_0$ до 1, где $a_э$ определяется по (9). При интегрировании от $\delta_0$ до 1, следуя [4—6], воспользуемся заменой выражения (10) для этого интервала на выражение

$$\frac{u}{v_{*э}} = \frac{1}{a_э}\ln\left[1 + \frac{a_э}{b_э}(y_0 - \delta_0)\right] + \delta + f(y_0/b_э),$$

которое при малых значениях $b_э$ отличается от (10) лишь малой поправкой $f(y_0/b_э)$, проявляющей только вблизи оси трубы.

Формулы для $w/v_{*э}$ и $\lambda_э$ имеют вид

(11) $$\frac{w}{v_{*э}} = \frac{1}{2}\mathrm{Re}_э b_э = \frac{1}{b_э}\left(\delta_0^2 - \delta_0^3 + \frac{\delta_0^4}{4}\right) + \frac{b_э^2}{a_э^3}\left[\alpha^2\left(\ln\alpha - \frac{3}{2}\right) + \right.$$

$$\left. + 2\alpha - \frac{1}{2}\right] + \delta - \varepsilon;$$

$$\lambda_э = \frac{8}{\left(\frac{\mathrm{Re}_э b_э}{2}\right)^2},$$

**Физические свойства жидкостей при температуре 20°С**

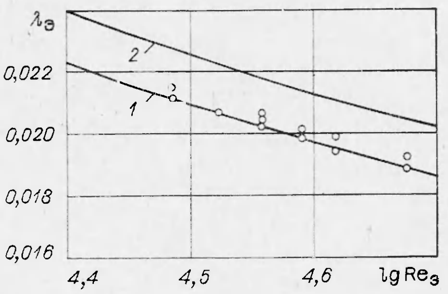
| Рабочая жидкость | Вязкость кинематическая, м²/с | Плотность, кг/м³ | Межфазное натяжение на границе раздела трансформаторное масло—вода, Н/м |
|---|---|---|---|
| Вода | $1{,}7\cdot10^{-6}$ | 998 | $44{,}8\cdot10^{-3}$ |
| Трансформаторное масло * | $24{,}3\cdot10^{-6}$ | 896 | |

* В трансформаторном масле поверхностно-активными являются асфальтово-смолистые вещества.

где
$$\mathrm{Re}_э = \frac{wD\rho_э}{\mu_э}, \quad \alpha = 1 + \frac{a_э}{b_э}(1 - \delta_0),$$

$\varepsilon$ — малая поправка, связанная с функцией $f(y_0/b_э)$, которой практически можно пренебречь. Формулы (11) дают параметрическую зависимость между $\mathrm{Re}_э$ и $\lambda_э$, причем параметром является величина $b_э$.

Экспериментальные исследования по определению коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda_э$ были проведены на установке, описанной в [9], при течении разбавленной эмульсии трансформаторного масла в воде в трубе диаметром 39,4 мм при температуре 19±1°С.




Жидкости, физические свойства которых приведены в таблице, подавались в экспериментальный участок путем выдавливания воздухом из емкостей, так что образование эмульсии в трубопроводе происходило только под действием турбулентных пульсаций.

На фигуре дано сравнение результатов экспериментов с расчетами по (11) для эмульсии с содержанием дисперсной фазы $\beta = 0{,}1$. Кривая *2* показывает закон сопротивления для чистой жидкости. Видно, что коэффициент сопротивления для разбавленной эмульсии (кривая *1*) существенно ниже, чем для чистой жидкости.

*Поступила 6 VIII 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Баранаев М. К., Теверовский Е. Н., Трегубова Э. Л.* О размере минимальных пульсаций в турбулентном потоке.— «Докл. АН СССР», 1949, т. 66, № 5.
2. *Колмогоров А. Н.* О дроблении капель в турбулентном потоке. — «Докл. АН СССР», 1949, т. 66, № 5.
3. *Левич В. Г.* Физико-химическая гидродинамика. М., Физматгиз, 1959.
4. *Миллионщиков М. Д.* Турбулентные течения в пограничном слое и в трубах. М., «Наука», 1969.
5. *Миллионщиков М. Д.* Турбулентные течения в пристеночном слое и в трубах.— «Атомная энергия», 1970, т. 28, вып. 3.
6. *Миллионщиков М. Д.* Законы сопротивления, тепло- и массообмена при турбулентном течении в трубах. Спец. докл. на VIII Всемирном нефтяном конгрессе. М., 1971.
7. *Brinkman H. C.* The viscosity of concentrated suspensions and solutions. — «J. Chem. Phys.», 1952, vol. 20, N 4.
8. *Медведев В. Ф.* Предельное напряжение сдвига эмульсий.— «Инж.-физ. журн», 1972, т. 24, № 4.
9. *Гужов А. И., Гришин А. П., Медведев В. Ф., Медведева Л. П.* Образование эмульсий при течении двух жидкостей в трубопроводе. — «Нефтяное хозяйство», 1973, № 8.